第39卷 第5期
2022年9月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 5
Sep. 2022

1991—2021年天山融雪末期雪线高度遥感监测研究

王靖文[1]， 唐志光[1]， 邓 刚[1]， 胡国杰[2]， 桑国庆[1]

（1. 湖南科技大学测绘遥感信息工程湖南省重点实验室，湖南 湘潭 411201；
2. 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室，甘肃 兰州 730000）

摘 要：研究融雪末期雪线高度变化有助于预测冰雪系统未来的变化趋势、理解区域和全球气候变化。基于Google Earth Engine（GEE）平台和Landsat卫星数据，发展了区域雪线高度提取模型，提取了天山4个子流域1991—2021年的融雪末期雪线高度，并分析了雪线高度的变化特征及其与气象因素的关系。结果表明：（1）Landsat提取的融雪末期雪线高度与Sentinel-2提取的融雪末期"最小化"积雪范围具有较高的一致性，其总体精度为91.6%，Kappa系数达0.9以上，利用该模型可准确获取融雪末期的区域雪线高度。（2）研究区近30 a融雪末期雪线高度呈明显的上升趋势，上升速率介于2.7~6.4 m·a^{-1}之间；其中，玛纳斯河流域雪线高度上升速度最快，阿克牙孜河流域雪线高度上升速度最慢。（3）夏季气温是影响研究区融雪末期雪线高度变化的主要因素（P< 0.05），降水对其影响相对较弱。

关键词：雪线高度；Landsat；遥感监测；气候变化；天山

雪线作为地球陆地表面积雪覆盖区与非积雪覆盖区之间的分界线[1]，其高度变化信息是冰雪水资源变化的直观反映。在中纬度地区，季节变化能引起雪线位置的升降，这种临时界线也称为季节雪线（或瞬时雪线）[2-4]。而在冰川学中雪线特指消融末期积雪存在的下限[5]，等同于融雪末期雪线[6-7]。融雪末期雪线相比季节雪线更具有气候意义，常用于指示冰川物质平衡[8-11]，直接反映着冰川的进退；研究融雪末期雪线高度变化有助于预测冰川和非季节性积雪未来的变化趋势、理解区域和全球气候变化[12]。因此，准确获取融雪末期雪线高度信息并实现其动态监测，不仅可为研究冰冻圈变化及其对气候变化的响应提供关键信息，对寒区水资源管理及其可持续利用也具有重要意义。

遥感技术在冰冻圈要素的时空变化研究中发挥着重要作用，已成为冰冻圈研究的重要技术手段[13-14]。MODIS遥感数据因高时间分辨率的特点，在大范围季节（或瞬时）雪线高度监测中应用广泛[10, 15-19]。Tang等[20]发展了基于MODIS积雪产品的融雪末期雪线高度遥感提取模型，提高了对亚洲高山区雪线高度的时空分布规律的宏观认识；但MODIS数据因受空间分辨率的限制，仅适用于大尺度融雪末期雪线高度的宏观遥感监测。Landsat系列卫星提供了长时序和较高分辨率的遥感数据（近年发展的Sentinel-2卫星时空分辨率更高），然而传统计算机难以满足处理海量遥感数据所需的存储与计算资源，使得这些高分辨率的遥感大数据尚未被充分挖掘和应用。现有基于Landsat系列遥感数据的雪线高度监测研究仅限于小范围局地区域[12, 21-24]。近年来，遥感云计算平台Google Earth Engine (GEE)的出现为遥感大数据挖掘提供了条件，并改变了传统遥感数据处理和分析的模式，使得全球范围长时间序列的分析和应用成为可能[25]；GEE强大的存储与云计算能力在积雪遥感领域也呈现出特有的优势[15, 26-28]。此外，如何降低光学遥感中云遮蔽的影响，一直是积雪遥感监测中面临的重要问题，也是有效获取雪线高度信息的关键。因此，综合高分辨率遥感大数据的优势，降低云遮蔽的影响，发展遥

收稿日期：2022-03-15； **修订日期：**2022-06-14
基金项目：国家自然科学基金项目（41871058）；冰冻圈科学国家重点实验室开放基金项目（SKLCS-OP-2020-08）；湖南省教育厅科研项目（20B227）
作者简介：王靖文（1998-），男，硕士研究生，主要从事积雪遥感方面的研究. E-mail: wangjingwen@mail.hnust.edu.cn
通讯作者：唐志光. E-mail: tangzhg11@hnust.edu.cn

感云计算平台支持下的融雪末期雪线高度提取模型，是准确监测大范围、长时序融雪末期雪线高度变化的重要途径。

天山被誉为"中亚水塔"，横亘于欧亚大陆腹地，由一系列高大山地、山间盆地和谷地组成，是世界上距离海洋最远、现代冰川发育最为广泛的山系之一[29]。天山丰富的冰川、积雪是中亚干旱区的重要水资源，对气候变化非常敏感。在过去的半个多世纪（1960—2016年），天山的年均气温呈显著增加趋势，增速为0.32 ℃·$(10a)^{-1}$，比全球气温增加速率高出0.19 ℃·$(10a)^{-1}$[30]。气候变暖引起的天山冰雪变化直接影响河川径流过程与水资源量的改变，导致中亚地区水资源的供需矛盾加剧，影响中亚区域国家之间关系以及"一带一路"倡议[31]。为此，开展天山雪线高度变化的遥感监测及其气候响应研究，可为研究气候变化对天山山区的水资源影响提供重要信息，对科学管理水资源、服务于"一带一路"倡议具有重要意义。

本文选取天山地区的4个山区流域作为研究对象，以Landsat系列（TM、ETM+、OLI）卫星数据为主要数据源，在遥感云计算平台GEE支持下，发展了融雪末期雪线高度提取模型，提取了4个流域1991—2021年的融雪末期雪线高度数据，并分析了研究区融雪末期雪线高度的变化特征及其与气候变化的关系。

1 研究区概况及数据

1.1 研究区概况

天山山脉横跨中国、哈萨克斯坦、吉尔吉斯坦和乌兹别克斯坦等国家。天山地形复杂，高山区降水量大且气温低，冰川发育广泛，其冰雪变化关系着诸多流域的水资源环境与水文过程。本文选择琼乌散库什河流域、木扎提河流域、阿克牙孜河流域和玛纳斯河流域作为研究的典型流域（图1），它们均发源于冰雪覆盖区，冰雪融水在河川径流中占有重要比例。琼乌散库什河和木扎提河发源于天山南坡，最终均汇入塔里木河流域，琼乌散库什河流域海拔4000 m以上，主要是冰雪覆盖，约占整个流域面积的35%，木扎提河流域内发育有大量的现代冰川，约占整个流域面积的48%；阿克牙孜河流域约20%集中在海拔高程4000 m以上的高山带；玛纳斯河发源于天山北坡，流入准噶尔盆地腹地，流域内海拔4000 m以上常年被冰川和非季节性积雪

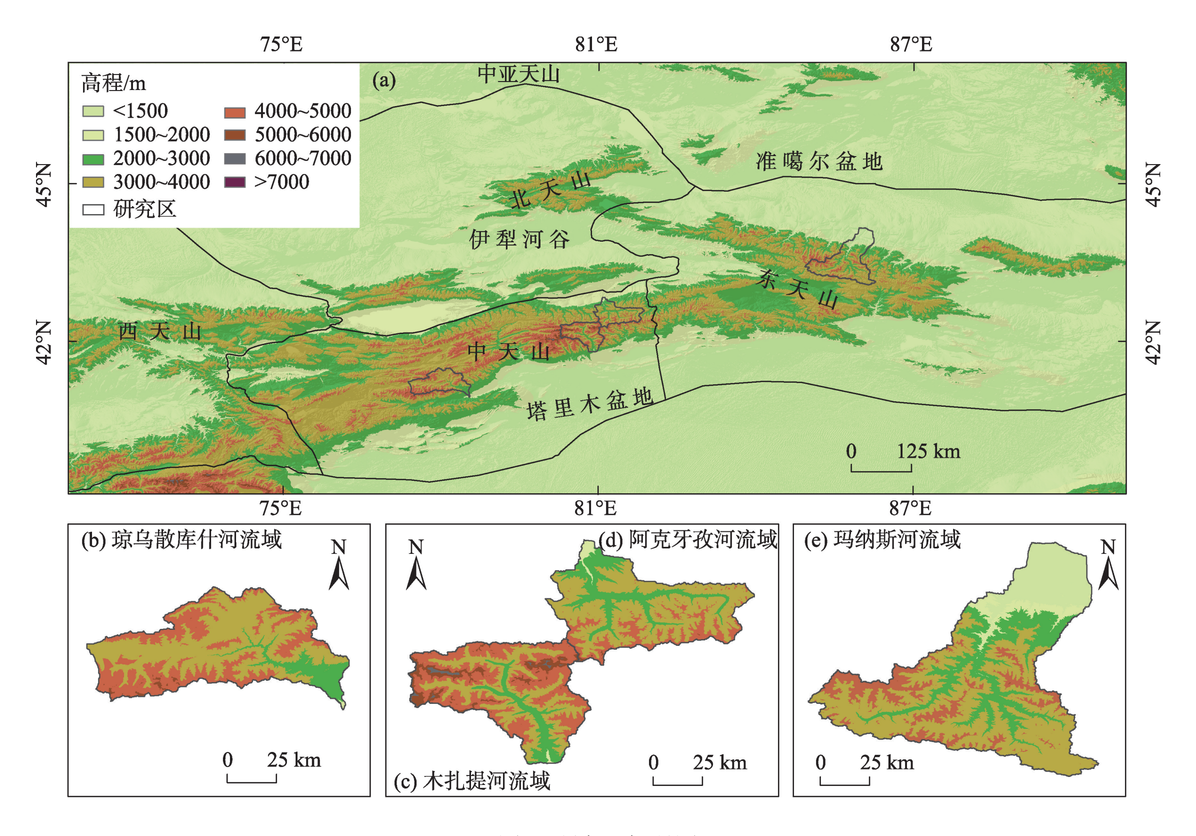


图1 研究区概况图

Fig. 1 Overview of the study area

覆盖,约占整个流域面积的15%。

1.2 数据来源

研究采用了 Landsat TM/ETM +/OLI、Sentinl-2 MSI、STRM DEM 和 ERA5-LAND 再分析数据集,这些数据均通过GEE云计算平台在线访问和处理。

1.2.1 Landsat 数据　采用Landsat系列数据中的陆表反射率(Land Surface Reflectance)数据,该数据已经过辐射定标和大气校正,消除了大气散射、吸收、反射引起的误差,空间分辨率为30 m,时间分辨率为16 d。该数据提供了由CFMask去云算法生成的质量评估(QA)波段,包含了对云和云阴影的标识。图2统计了各研究区逐年融雪期(6—9月)共享的Landsat影像数量,以及研究区内云量小于20%的影像频次;利用Landsat数据可以实现研究区1991年至今的融雪末期雪线高度监测。

1.2.2 Sentinel-2 MSI 数据　欧洲航天局(ESA)发射的Senitnel-2卫星由Sentinel-2A和Sentinel-2B组成,分别于2015年、2017年发射,双星重访周期为5 d,均携带多光谱成像仪(MSI),共有13个通道,空间分辨率有10 m、20 m和60 m。本文采用Sentinel-2 MSI数据的Level-2A产品对Landsat数据的雪线高度提取结果进行验证;该产品为经过辐射定标和大气校正的地表反射率产品,选用数据波段的空间分辨率为10 m。

1.2.3 SRTM DEM 数据　用于提取雪线高度信息的DEM数据为SRTM DEM数据(NASA 3.0版)。该数据通过ASTER GDEM2、GMTED2010和NED数据对原始SRTM数据的缺失值进行填补,空间分辨率为30 m。该数据的全球垂直精度约为16 m,在中国地形平坦地区,绝对垂直精度约为14 m,地形起伏较大山区绝对垂直精度约为26 m[32]。

1.2.4 ERA5-LAND 再分析数据集　ERA5-LAND再分析数据集来源于欧洲中期天气预报中心(European Centre For Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF),该数据集提供了1979年1月至今的全球降水、气温等变量数据。本文采用该数据集中的月平均气温和降水数据,空间分辨率为10 km,以探究研究区融雪末期雪线高度的变化与气候因子之间的响应关系。

2 研究方法

选取接近融雪末期的多时相Landsat TM/ETM+/OLI影像为数据源,构建雪线高度提取模型的技术路线如图3所示。具体的方法主要包括积雪遥感识

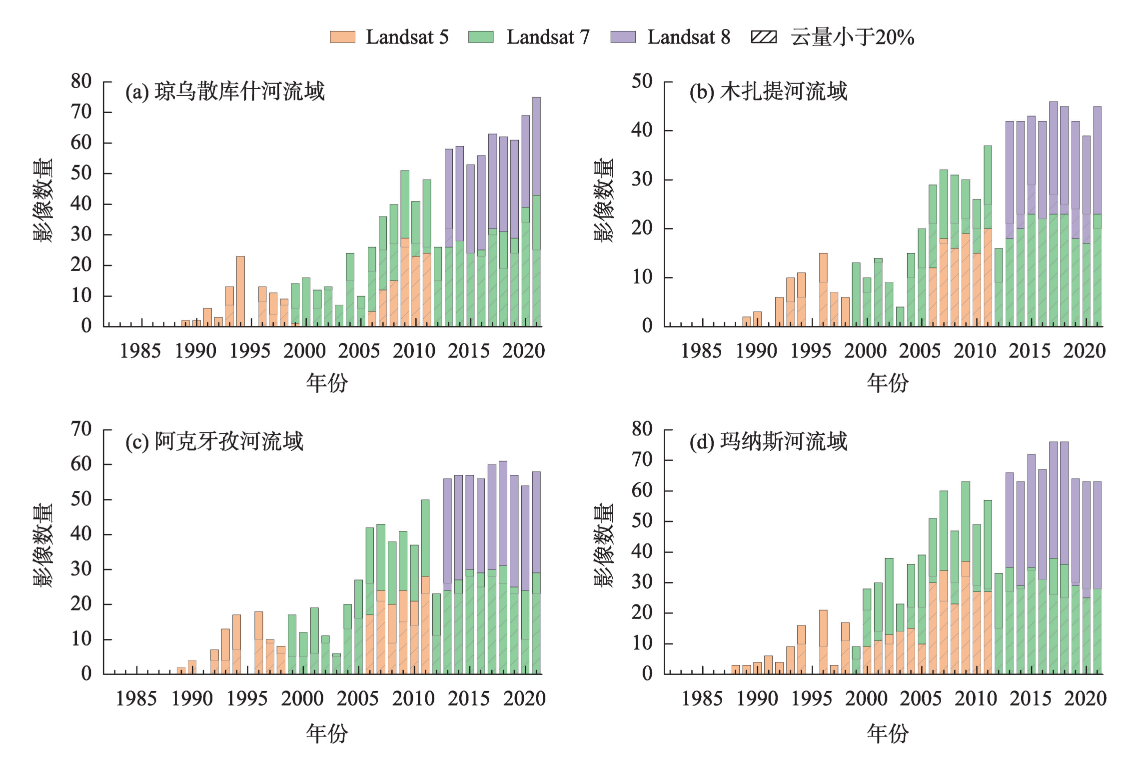


图2　研究区域融雪期覆盖的影像数量

Fig. 2　Number of image covered by the study area at the melting season

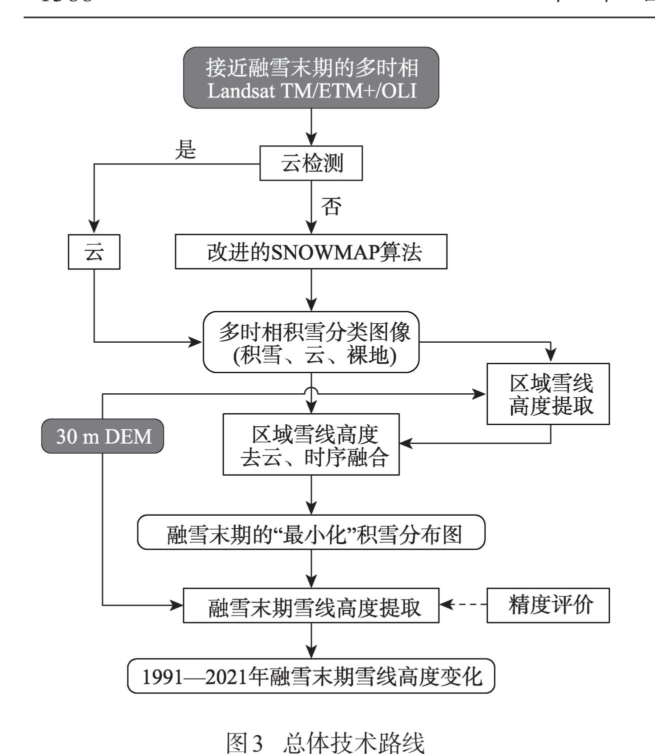


图3　总体技术路线

Fig. 3　Overall technical route

别、融雪末期"最小化"积雪范围提取、区域雪线高度提取和精度验证。

2.1　积雪遥感识别

采用SNOWMAP算法[33]提取积雪范围。该算法基于积雪在可见光波段,具有较高的反射率,在短红外波段具有较强的吸收特征,建立归一化积雪指数(Normalized Difference Snow Index, NDSI),设置合适的阈值,用以确定积雪覆盖范围。NDSI计算公式为:

$$\mathrm{NDSI}=\frac{\rho_{\mathrm{Green}}-\rho_{\mathrm{SWIR}}}{\rho_{\mathrm{Green}}+\rho_{\mathrm{SWIR}}} \tag{1}$$

式中:ρ_{Green}和ρ_{SWIR}分别代表Landsat数据中的绿光波段和短波红外的反射率值。由于水体和积雪具有相似的波段反射特性,为了避免水体、阴影被误识别为积雪,增加1个判别条件即近红外波段反射率值(ρ_{NIR})>0.11。相关研究证明了NDSI阈值为0.29更适合于青藏高原地区的积雪制图[34]。因此,本研究将NDSI> 0.29 & ρ_{NIR}>0.11的像元识别为积雪像元,不满足上述条件的归类为非雪像元,最终将识别得到的积雪、非雪与QA波段识别得到的云合成得到积雪分类图(雪、云、非雪)。

2.2　融雪末期"最小化"积雪范围提取

通过瞬时雪线高度去云和时序融合,以减少云的影响并得到最能代表融雪末期的"最小化"积雪范围。

2.2.1　瞬时雪线高度去云　对区域内云和雪的比例进行判断,若云和雪面积比例≤1/2,则提取该区域的瞬时雪线高度以进行去云处理。瞬时雪线去云策略:如果云像元对应的地面海拔高度大于瞬时区域雪线高度,则归类为积雪;反之,则归类为陆地。因云覆盖的比例过大,容易出现积雪像元极少或者积雪覆盖区周围均为云覆盖,导致提取的瞬时雪线高度存在较大偏差或者无法提取。为了保证提取的瞬时区域雪线高度的有效性,本研究设定云和雪面积比例>1/2时,则直接参与时序融合处理。

2.2.2　时序融合　对接近融雪末期的多时相积雪分类图像(包含瞬时雪线高度去云后图像)进行时序融合,以完成积雪范围的最小化合成,最终得到能代表融雪末期的"最小化"积雪范围图。时序融合策略:对每一像元,如果被任一时相识别为裸地,则归类为裸地;如果50%以上的像元被识别为积雪,而其他时相都为云,则归类为积雪;如果50%以上的像元被识别为云,而其他时相都为雪,则归类为云。融合后得到的代表融雪末期的"最小化"积雪范围图,用于融雪末期雪线高度的提取。

2.3　区域雪线高度(RSLA)提取

区域雪线高度法的原理为:在目标区域内找出一个高程,使得该高程之上的非雪像元数量与该高程之下的积雪像元数量之和最小,那么这一高程就代表该区域内的雪线高度(图4),公式表示为:

$$sum=C_{\mathrm{below}}+C_{\mathrm{above}} \tag{2}$$

$$sum_{\mathrm{RSLA}}=\mathrm{Min}(sum_{\mathrm{elev_{min}}},sum_{\mathrm{elev_{min}+1}},\cdots,sum_{\mathrm{elev_{max}}}) \tag{3}$$

式中:sum为高程之下积雪像元数量(C_{below})与高程之上非雪像元数量(C_{above})之和;RSLA为区域雪线高度;$\mathrm{elev_{min}}$为区域内最低高程;$\mathrm{elev_{max}}$为区域内最高高程。

具体过程为:从区域最低高程开始,计算目标高程之下的积雪像元数量与该高程之上的非雪像元数量之和,然后每隔1 m高程进行1次该计算,直到区域内最高高程。然后利用最小值函数(Min)来检索数量和中的最小值sum_{RSLA},sum_{RSLA}所对应的高程即为目标区域的雪线高度。该方法可以允许部分云覆盖的存在,是实现目标区域雪线高度的最优估算,因而也适用于积雪图像的去云处理。

2.4　雪线高度的精度评估

采用空间分辨率更高、重访周期更短的Senti-

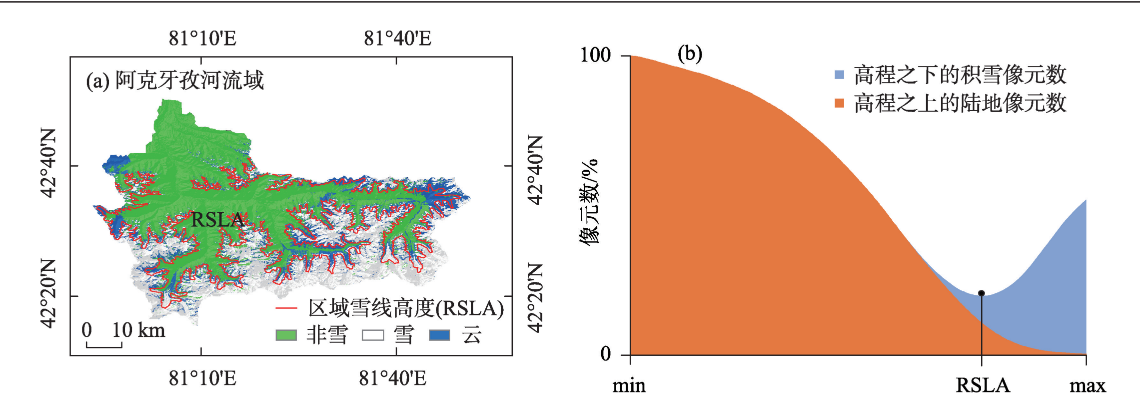


图4　区域雪线高度提取示意图

Fig. 4　Sketch map of the extraction of regional snowline altitude

nel-2影像，通过提取融雪末期“最小化”积雪范围，来验证Landsat数据提取融雪末期区域雪线高度的精度。具体验证方法：选取2019—2021年研究区接近融雪末期且云量低于10%的多时相Sentinel-2遥感影像(表1)，采用目视解译法，对每一影像进行积雪范围制图；然后将接近融雪末期的多时相积雪范围图进行时序融合，得到Sentinel-2提取的融雪末期“最小化”积雪范围(作为融雪末期积雪范围“真值”)。最后，基于Sentinel-2提取的融雪末期“最小化”积雪范围图，在雪线位置附近进行验证样本的随机采样，并结合DEM数据和Landsat提取的融雪末期区域雪线高度值，计算融雪末期雪线高度提取模型的总体精度(OA)、精确率(Pre)和召回率(Rec)，计算公式如下：

$$\mathrm{OA}=\frac{A+D}{A+B+C+D}\times 100 \tag{4}$$

$$\mathrm{Pre}=\frac{A}{A+B}\times 100 \tag{5}$$

表1　研究区域Sentinel-2影像覆盖数量

Tab. 1　Number of Sentinel-2 image covered by the study area

	覆盖数量	分布时间/年-月-日
琼乌散库什河流域	26	2019-06-01—2019-09-30 2020-06-01—2020-09-30 2021-06-01—2021-09-30
木扎提河流域	24	2019-06-01—2019-09-30 2020-06-01—2020-09-30 2021-06-01—2021-09-30
阿克牙孜河流域	26	2019-06-01—2019-09-30 2020-06-01—2020-09-30 2021-06-01—2021-09-30
玛纳斯河流域	24	2019-06-01—2019-09-30 2020-06-01—2020-09-30 2021-06-01—2021-09-30

$$\mathrm{Rec}=\frac{A}{A+C}\times 100 \tag{6}$$

式中：A为高于Landsat融雪末期雪线高度且在Sentinel-2“最小化”积雪范围中识别为积雪的点数；B为高于Landsat融雪末期雪线高度且在Sentinel-2“最小化”积雪范围中识别为非雪的点数；C为低于Landsat融雪末期雪线高度且在Sentinel-2“最小化”积雪范围中识别为积雪的点数；D为低于Landsat融雪末期雪线高度且在Sentinel-2“最小化”积雪范围中识别为非雪的点数。Pre>Rec时，代表雪线高度存在高估；Pre<Rec时，代表雪线高度存在低估。

3　结果与分析

3.1　融雪末期雪线高度精度评估结果分析

通过建立混淆矩阵，计算研究区域融雪末期雪线高度提取结果的Pre、Rec、OA和Kappa系数，对提取结果的精度进行定量评价(表2)。结果表明：4个流域融雪末期雪线高度提取结果具有较高的精度，OA介于87.5%~94.4%之间，Kappa系数介于0.86~0.93之间；平均OA和Kappa系数分别为91.6%和0.9。然而，4个流域Pre均略低于Rec，说明相比时间分辨率更高的Sentinel-2融雪末期“最小化”积雪范围，Landsat提取的融雪末期雪线高度略有低估。以阿克牙孜河流域为例，OA为92.7%，说明Landsat提取的融雪末期雪线高度与Sentinel-2提取的融雪末期“最小化”积雪范围之间具有较高的一致性；精确率Pre为87.06%，说明在Landsat提取的融雪末期雪线高度之上且在Sentinel-2提取的“最小化”积雪范围中被识别为非积雪的概率为12.94%；而该流域Rec为93.97%，说明在Landsat提取雪线高度之下且

表2 Landsat融雪末期雪线高度提取结果精度评价

Tab. 2 Accuracy evaluation of snowline altitude extraction results at the end of melting season

研究子区		Sentinel-2提取的验证样本		精度指标
		积雪/个数	非雪/个数	
琼乌散库什河流域	高于Landsat提取雪线高度	291	76	Pre=79.29%
	低于Landsat提取雪线高度	49	584	Rec=85.59%
				OA=87.5%
				Kappa=0.86
木扎提河流域	高于Landsat提取雪线高度	391	68	Pre=85.19%
	低于Landsat提取雪线高度	16	525	Rec=96.07%
				OA=91.6%
				Kappa=0.90
阿克牙孜河流域	高于Landsat提取雪线高度	343	51	Pre=87.06%
	低于Landsat提取雪线高度	22	584	Rec=93.97%
				OA=92.7%
				Kappa=0.92
玛纳斯河流域	高于Landsat提取雪线高度	406	34	Pre=92.27%
	低于Landsat提取雪线高度	22	517	Rec=94.86%
				OA=94.4%
				Kappa=0.93

在Sentinel-2提取的"最小化"积雪范围中被识别为积雪的概率仅为6.03%。

3.2 融雪期雪线高度时空变化特征

获取各流域6—9月以16 d为间隔的多年雪线高度数据(图5)。雪线高度在6—9月呈现出强烈的季节性变化。从6月开始,随着积雪的快速融化,研究区积雪覆盖率逐渐降低、雪线高度逐渐升高,瞬时雪线高度的最大值主要出现在8月,而8月以后雪线高度又逐渐降低;且研究区瞬时雪线高度体现出较强的年际波动(图5)。以2020年阿克牙孜河流域的瞬时雪线高度变化为例(图6),雪线高度在6—8月逐渐升高,从6月的3775 m上升到8月的3936 m,而9月雪线高度又下降到3458 m;经模型提取的融雪末期雪线高度为3967 m,高于每一瞬时雪线高度。

3.3 融雪末期雪线高度年际变化特征

1991—2021年研究区域融雪末期雪线高度总体上呈明显的上升趋势(图7)。琼乌散库什河流域和玛纳斯河流域融雪末期雪线高度最高值均出现在2018年,最低值分别出现在2003年和1994年;木扎提河流域和阿克牙孜河流域融雪末期雪线高度最高值、最低值分别出现在2016年、2015年和1993年、1998年,4个流域近30 a融雪末期雪线高度振幅均不超过400 m。琼乌散库什河流域多年平均融雪末期雪线高度为4504 m,趋势斜率为4.5 m·a^{-1},该流域近30 a融雪末期雪线高度上升了约135 m;木扎提河流域多年平均融雪末期雪线高度为4207 m,趋势斜率为3.1 m·a^{-1},近30 a融雪末期雪线高度上升约93 m;玛纳斯河流域融雪末期雪线高度总体上与木扎提河流域接近,该流域多年平均融雪末期雪线高度为4212 m,趋势斜率最高,为6.4 m·a^{-1},近30 a融雪末期雪线高度上升约192 m;阿克牙孜河流域多年平均融雪末期雪线高度为3955 m,趋势斜率在4个流域中最低,为2.8 m·a^{-1},近30 a融雪末期雪线高度上升约84 m。此外,通过计算研究区融雪末期雪线高度的标准差(σ),来反映融雪末期雪线高度的年际波动幅度(图7)。结果表明:木扎提河流域融雪末期雪线高度标准差最小(σ=59 m),说明该流域的融雪末期雪线高度年际波动最小,琼乌散库什河流域融雪末期雪线高度标准差最大(σ=94 m),说明该流域对应的融雪末期雪线高度年际波动最大。

3.4 融雪末期雪线高度变化与气温、降水之间的关系

雪线高度与气候之间的关系非常密切。本文通过计算年平均和夏季平均气温、年总和夏季总降水量与融雪末期雪线高度之间的相关关系,分析融雪末期雪线高度与气候变化之间的响应关系(表3),其中,年降水量和年气温指的是由上一年10月到当年9月的总降水量和平均气温。琼乌散库什河流域年降水量和夏季降水量均呈微弱的增加趋势,

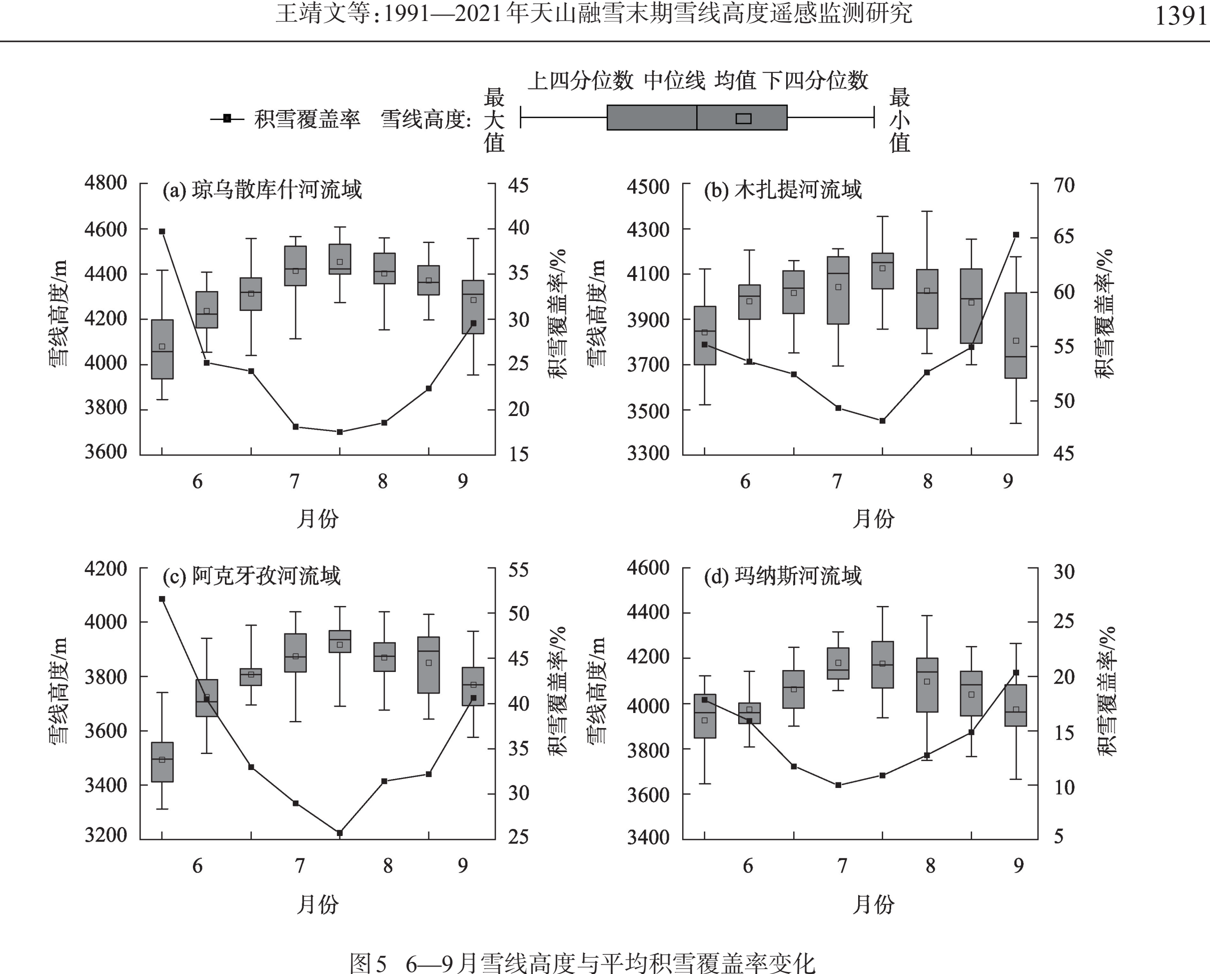


图5 6—9月雪线高度与平均积雪覆盖率变化

Fig. 5 Variation of snowline altitude and snow cover percentage from June to September

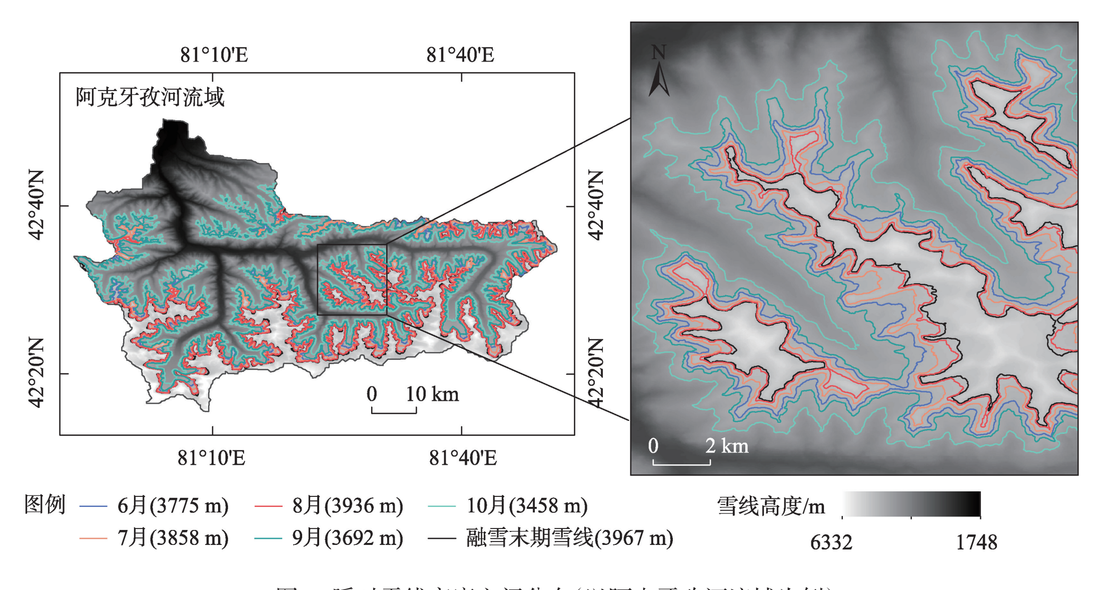
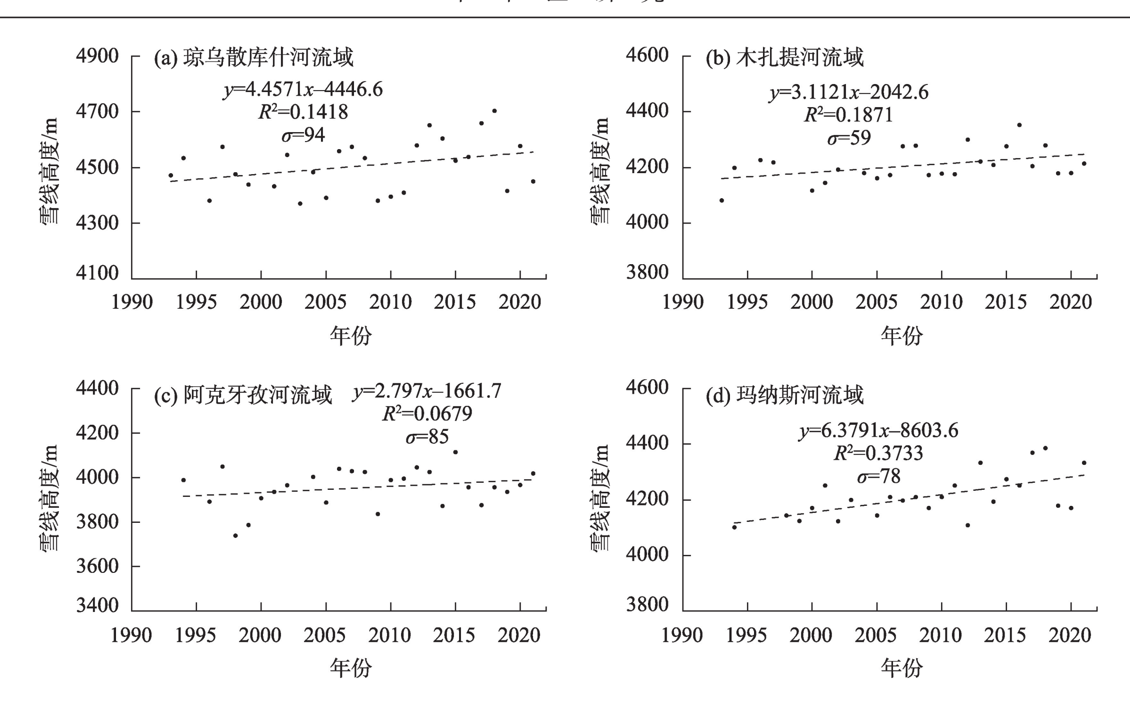


图6 瞬时雪线高度空间分布(以阿克牙孜河流域为例)

Fig. 6 Spatial distribution of instantaneous snowline altitude (Take the Akyazi River basin for example)

木扎提河流域、阿克牙孜河流域和玛纳斯河流域年降水量和夏季降水量均呈减少趋势;各流域年均气温和夏季平均气温均呈上升趋势(图8)。其中,木扎提河流域多年年平均气温(-8.9 ℃)和夏季平均气温(1.9 ℃)最低,玛纳斯河流域多年年平均气温(-3.3 ℃)和夏季平均气温(8.7 ℃)最高;琼乌散库什河流域多年年平均降水量(485.8 mm)和夏季平均降水量(306.3 mm)最少,阿克牙孜河流域多年年平均



注:由于云层遮挡和影像缺失等原因,有些年份获取不到融雪末期雪线高度。

图7 融雪末期雪线高度年际变化

Fig. 7 Interannual variation of snowline altitude at the end of melting season

表3 融雪末期雪线高度与气温、降水量之间的相关性

Tab. 3 Correlation between snowline altitude at the end of melting season, temperature and precipitation

	夏季气温相关性	年气温相关性	夏季降水量相关性	年降水量相关性
琼乌散库什河流域	0.485	0.352	−0.105	−0.221
木扎提河流域	0.558**	0.451*	−0.232	−0.133
阿克牙孜河流域	0.503**	0.361	−0.136	−0.321
玛纳斯河流域	0.391*	0.366	−0.322	−0.371

注:*、**分别表示通过0.05和0.01的显著性水平检验。

降水量(930.6 mm)和夏季平均降水量(596.1 mm)最多。研究区融雪末期雪线高度与气温之间呈正相关关系,特别是与夏季气温之间呈显著正相关关系($P<0.05$);而融雪末期雪线高度与降水量之间呈较弱的负相关关系,这表明夏季气温是影响融雪末期雪线高度变化的主要因素。

为探究研究区融雪末期雪线高度对气候变化的敏感性,采用多元线性回归方法建立了融雪末期雪线高度与夏季气温和年降水量回归模型:

$$SLA=\lambda+aT-bP \tag{7}$$

式中:SLA为融雪末期雪线高度;λ为常数;T为夏季气温(℃);P为年降水量(mm);a、b为回归系数。4个流域回归系数如表4所示,以阿克牙孜河流域为例,当夏季气温升高或降低1 ℃时,阿克牙孜河流域的融雪末期雪线高度将升高或降低76.2 m;当年降水量增加或减少100 mm时,该流域的融雪末期雪线高度将降低或升高28.7 m。说明在阿克牙孜河流域,夏季气温升高1 ℃引起的融雪末期雪线高度上升需要增加265 mm的降水量才能弥补。琼乌散库什河流域夏季气温回归系数最大(82.9),意味着该流域融雪末期雪线高度变化对夏季气温响应最为敏感。玛纳斯河流域年降水回归系数最大(0.38),说明该流域融雪末期雪线高度变化对年降水量响应最为敏感。

4 讨 论

4.1 积雪制图与雪线高度提取的不确定性

积雪制图和雪线高度提取的不确定性主要来自以下4个方面:(1) 利用光学遥感影像提取山区

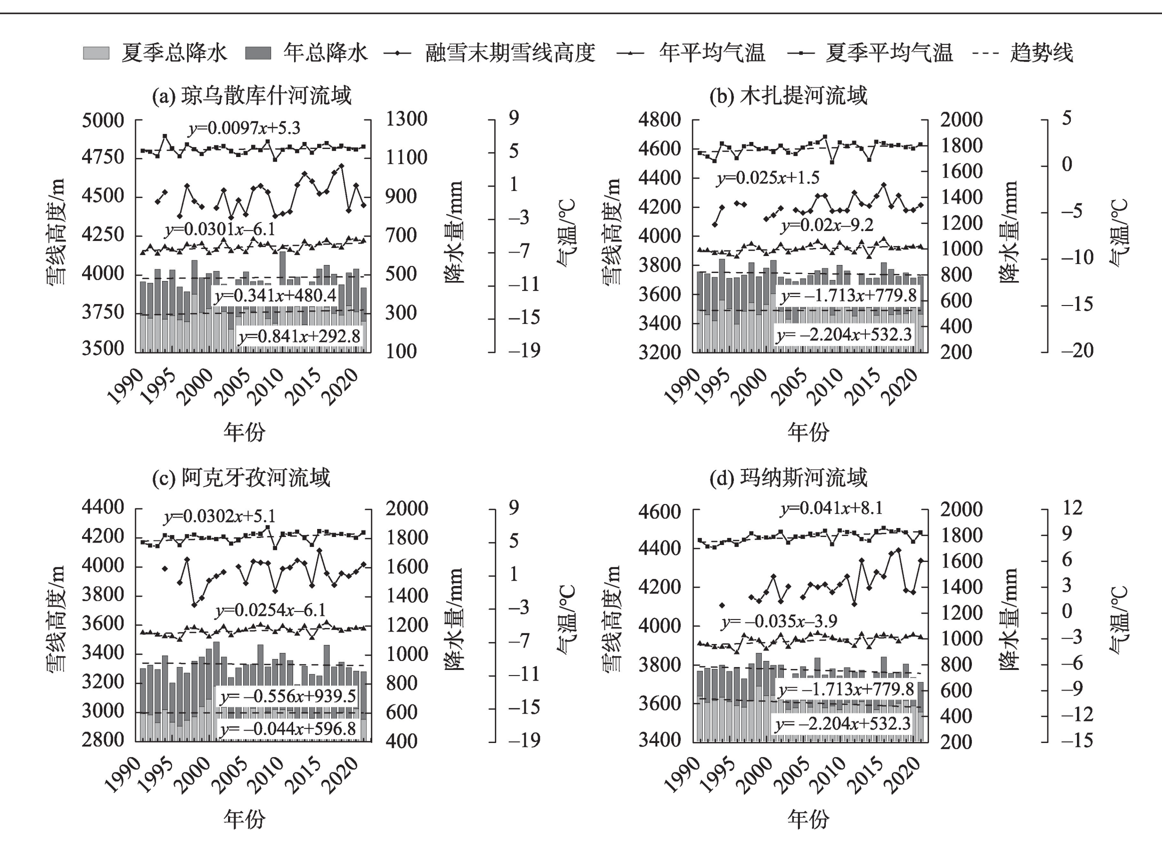


图8　融雪末期雪线高度与气温和降水量的年际变化

Fig. 8　Interannual variations of temperature and precipitation between snowline altitude at the end of melting season

表4　融雪末期雪线高度回归模型系数

Tab. 4　Regression model coefficients of snowline altitude at the end of melting season

	回归因子系数			相关系数(R)	显著性水平
	λ	a	b		
琼乌散库什河流域	4220	82.9	0.355	0.515	$P<0.05$
木扎提河流域	4294	50.7	0.238	0.559	$P<0.01$
阿克牙孜河流域	4040	76.2	0.287	0.548	$P<0.01$
玛纳斯河流域	4009	62.4	0.364	0.520	$P<0.05$

积雪信息时，地形起伏产生的山体阴影会影响积雪范围提取的准确性，这种影响也被称为地形效应。通过地形校正[35-36]可以较好地消除地形效应对山区积雪识别的影响。此外，如果是像元尺度雪线高度的提取，还应定量分析坡向对雪线高度的影响。本研究专注的是区域性雪线高度的提取。该方法求解得到的唯一高程值代表了一个区域内的综合雪线高度。因而，本研究没有考虑地形效应以及坡向等微地形因子的影响。(2) 云和云阴影的存在也是影响光学遥感中积雪信息提取的主要误差来源。本文基于Landsat系列数据，采用瞬时雪线去云和时序融合的方法进行去云处理。而Sentinel-1搭载了合成孔径雷达(SAR)，该数据具有全天时、全天候和穿透性的特点，不受天气和太阳光照条件的影响；Sentinel-2数据为多光谱卫星成像，该数据具有较高的时间分辨率(5 d)。在后续的进一步研究中可以结合Sentinel-1和Sentinel-2数据，增强云下积雪识别的能力。(3) 对于森林覆盖区积雪的提取精度较差，树木的冠层会挡住地面部分的积雪信息。基于NDSI、NDFSI(Normalized Difference Forest Snow Index)、NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)的多指标积雪识别方法[37-38]，可有效提取林下积雪信息。但融雪末期雪线高度要远高于森林植被区，所以本研究没有考虑森林的影响。(4) 因大部分裸

露冰川表面不清洁(表碛覆盖)反照率明显低于积雪,因而不清洁的裸露冰川和非季节性积雪可以通过光学遥感(NDSI阈值)进行区分。然而,融雪末期雪线高度的提取,也应该注重区分非季节性积雪与表面清洁的冰川;例如可利用两者在近红外波段上所表现出的不同特征,根据近红外波段影像直方图分类出冰川和积雪[39-40]。特别是随着Sentinel-1等星载合成孔径雷达的出现,使冰川和积雪的区分更具可能性。

本研究中的融雪末期雪线高度提取方法仅适合于区域(或者流域)尺度的雪线高度提取。但若注重分析像元尺度雪线高度的时空差异性(比如坡向、坡度等微地形因子的影响),应采用像元尺度雪线高度提取方法[19,41-42]。

4.2 融雪末期雪线高度的空间分异

本研究发现,近30 a来研究区域融雪末期雪线高度呈上升趋势,这与天山物质平衡处于负平衡状态的研究结论是一致的[43]。从研究区域每年的融雪末期雪线高度来看,琼乌散库什河流域总体融雪末期雪线高度明显高于其他3个流域,阿克牙孜河流域融雪末期雪线高度处于最低水平。造成这种雪线高度分布特征的主要原因为:琼乌散库什河流域位于天山南坡,天山南坡为阳坡,受到太阳辐射量较多,造成气温相对于北坡较高[44];且该流域地势总体比较高,受山体海拔影响,所以该地区融雪末期雪线高度最高;阿克牙孜河流域位于天山北坡,受大西洋和北冰洋的水汽影响[45],降水量相对充沛,太阳辐射量少,气温相对较低,因而阿克牙孜河流域融雪末期雪线高度最低。

4.3 气候变化对融雪末期雪线高度的影响

雪线作为一种气候标志线,其高度受气候因素的影响同时也会反映气候的变化。现有的研究[42,46]表明:在全球气候变暖的影响下冰川面积不断萎缩,雪线高度持续升高,这与本文的研究相一致。本研究发现,夏季气温是影响融雪末期雪线高度变化的主要因素,以往有关高山区融雪末期雪线或者冰川平衡线变化的研究也得出类似结论:Tang等[20]基于MODIS数据从30 km格网尺度也发现了2001—2016年亚洲高山区融雪末期雪线高度总体呈上升趋势,特别是在天山地区和喜马拉雅地区上升明显,夏季气温是主要影响因素;陈安安等[47]、王宁练等[48]发现,夏季气温是影响冰川平衡线变化的主导因子。雪线高度与气温呈正相关关系,气温升高会促进雪线高度的升高;雪线高度与降水量呈负相关关系,降水量增加会引起雪线高度的降低。在后续的研究中可以基于遥感提取的长时序雪线高度、气温和降水等气象数据,利用机器学习方法构建雪线高度变化的预测模型。

5 结 论

本文基于GEE云计算平台和Landsat影像,发展了融雪末期区域雪线高度遥感提取模型,提取了天山4个流域近30 a长时间序列的融雪末期雪线高度;并对4个流域融雪末期雪线高度的时空变化特征及其与气温、降水之间的关系进行分析,得出以下结论:

(1) 模型提取的融雪末期雪线高度与Sentinel-2提取的融雪末期"最小化"积雪范围具有较高的一致性,平均总体精度为91.6%;Kappa系数平均值为0.9。利用该提取模型可准确提取流域内融雪末期区域雪线高度,可有效应用于流域尺度、长时间序列雪线高度的遥感监测。

(2) 研究区1991—2021年融雪末期雪线高度年际波动较大,但总体上呈现出上升趋势。阿克牙孜河流域融雪末期雪线高度上升速率最慢($2.8\ m\cdot a^{-1}$),玛纳斯河流域融雪末期雪线高度上升速率最快($6.4\ m\cdot a^{-1}$)。

(3) 研究区融雪末期雪线高度主要受气温的影响,与夏季气温之间具有显著的正相关关系,与降水量之间具有较弱的负相关关系。当夏季气温升高(降低)1 ℃时,流域融雪末期雪线高度约升高(降低)50.7~82.9 m;当年降水量增加(减少)100 mm时,流域融雪末期雪线高度将约降低(升高)23.8~36.4 m。

(4) GEE平台强大的存储与计算能力等,大幅提高了雪线高度遥感提取的效率,为长时序、大范围遥感雪线高度监测提供了强有力的计算资源保障。

参考文献(References):

[1] Licker M D. Dictionary of Earth Science[M]. New York: McGraw-Hill, 2003.

[2] Mengel J, Short D, North G. Seasonal snowline instability in an energy balance model[J]. Climate Dynamics, 1988, 2(3): 127-131.

[3] Baum S K, Crowley T J. Seasonal snowline instability in a climate

model with realistic geography: Application to carboniferous (~300 MA) glaciation[J]. Geophysical Research Letters, 1991, 18(9): 1719-1722.

[4] 谢自楚, 刘潮海. 冰川学导论[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2010. [Xie Zichu, Liu Chaohai. Leading Principles of Glaciology [M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2010.]

[5] 秦大河, 姚檀栋, 丁永建. 冰冻圈科学辞典[M]. 北京: 气象出版社, 2014. [Qin Dahe, Yao Tandong, Ding Yongjian. Glossary of Cryospheric Science[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2014.]

[6] Pandey P, Kulkarni A V, Venkataraman G. Remote sensing study of snowline altitude at the end of melting season, Chandra-Bhaga basin, Himachal Pradesh, 1980-2007[J]. Geocarto International, 2013, 28(4): 311-322.

[7] Flint R F. Glacial and Quaternary geology[M]. New York: John Wiley Press, 1971.

[8] Rabatel A, Bermejo A, Loarte E, et al. Can the snowline be used as an indicator of the equilibrium line and mass balance for glaciers in the outer tropics?[J]. Journal of Glaciology, 2012, 58(212): 1027-1036.

[9] 郭忠明, 顾祝军, 吴红波, 等. 冰川雪线高度研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(4): 645-652. [Guo Zhongming, Gu Zhujun, Wu Hongbo, et al. Research progress of glacier snowline altitude [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(4): 645-652.]

[10] Shea J, Menounos B, Moore R, et al. An approach to derive regional snow lines and glacier mass change from MODIS imagery, western North America[J]. The Cryosphere, 2013, 7(2): 667-680.

[11] Barandun M, Huss M, Usubaliev R, et al. Multi-decadal mass balance series of three Kyrgyz glaciers inferred from modelling constrained with repeated snow line observations[J]. The Cryosphere, 2018, 12(6): 1899-1919.

[12] McFadden E, Ramage J, Rodbell D. Landsat TM and ETM+ derived snowline altitudes in the Cordillera Huayhuash and Cordillera Raura, Peru, 1986-2005[J]. The Cryosphere, 2011, 5(2): 419-430.

[13] 车涛, 李新, 李新武, 等. 冰冻圈遥感: 助力"三极"大科学计划[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(4): 484-493. [Che Tao, Li Xin, Li Xinwu, et al. Developing cryospheric remote sensing, poromoting scientific programme of Earth's Three Poles[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(4): 484-493.]

[14] Guo H, Li X, Qiu Y. Comparison of global change at the earth's three poles using spaceborne earth observation[J]. Science Bulletin, 2020, 65(16): 1320-1323.

[15] Notarnicola C. Hotspots of snow cover changes in global mountain regions over 2000-2018[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 243: 111781.

[16] Verbyla D, Hegel T, Nolin A W, et al. Remote sensing of 2000-2016 alpine spring snowline elevation in dall sheep mountain ranges of Alaska and Western Canada[J]. Remote Sensing, 2017, 9 (11): 1157.

[17] Spiess M, Huintjes E, Schneider C. Comparison of modelled-and remote sensing-derived daily snow line altitudes at Ulugh Muztagh, northern Tibetan Plateau[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(4): 593-613.

[18] Krajčí P, Holko L, Perdigão R A, et al. Estimation of regional snowline elevation (RSLE) from MODIS images for seasonally snow covered mountain basins[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 1769-1778.

[19] Tang Z, Wang J, Li H, et al. Extraction and assessment of snowline altitude over the Tibetan plateau using MODIS fractional snow cover data (2001 to 2013)[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014, 8(1): 084689.

[20] Tang Z, Wang X, Deng G, et al. Spatiotemporal variation of snowline altitude at the end of melting season across high mountain Asia, using MODIS snow cover product[J]. Advances in Space Research, 2020, 66(11): 2629-2645.

[21] Girona-Mata M, Miles E S, Ragettli S, et al. High-resolution snowline delineation from Landsat imagery to infer snow cover controls in a Himalayan catchment[J]. Water Resources Research, 2019, 55 (8): 6754-6772.

[22] Hu Z, Dietz A, Kuenzer C. The potential of retrieving snow line dynamics from Landsat during the end of the ablation seasons between 1982 and 2017 in European mountains[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019, 78: 138-148.

[23] Guo Z, Wang N, Wu H, et al. Variations in firn line altitude and firn zone area on Qiyi Glacier, Qilian Mountains, over the period of 1990 to 2011[J]. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2015, 47(2): 293-300.

[24] 张其兵, 康世昌, 张国帅, 等. 念青唐古拉山脉西段雪线高度变化遥感观测[J]. 地理科学, 2016, 36(12): 1937-1944. [Zhang Qibing, Kang Shichang, Zhang Guoshuai, et al. Changes of snow line altitude for glaciers on western Nyainqentanglha range observed by remote sensing[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(12): 1937-1944.]

[25] 付东杰, 肖寒, 苏奋振, 等. 遥感云计算平台发展及地球科学应用[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 220-230. [Fu Dongjie, Xiao Han, Su Fenzhen,et al. Remote sensing cloud computing plat form development and earth science application[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 220-230.]

[26] Wayand N E, Marsh C B, Shea J M, et al. Globally scalable alpine snow metrics[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 213: 61-72.

[27] 刘畅, 李震, 张平, 等. 基于Google Earth Engine评估新疆西南部 MODIS 积雪产品[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(4): 584-592. [Liu Chang, Li Zhen, Zhang Ping, et al. Evaluation of MODIS snow products in southwestern Xinjiang using the Google Earth Engine[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33

(4): 584-592.]

[28] Crumley R L, Palomaki R T, Nolin A W, et al. Snow cloud metrics: snow information for everyone[J]. Remote Sensing, 2020, 12(20): 3341.

[29] Sorg A, Bolch T, Stoffel M, et al. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan(Central Asia) [J]. Nature Climate Change, 2012, 2(10): 725-731.

[30] Xu M, Kang S, Wu H, et al. Detection of spatio-temporal variability of air temperature and precipitation based on long-term meteorological station observations over Tianshan Mountains, Central Asia [J]. Atmospheric research, 2018, 203: 141-163.

[31] 陈亚宁, 李稚, 方功焕, 等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 18-26. [Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan, et al. Impact of climate change on water resources in the Tianshan Mountians, Central Asia[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 18-26.]

[32] Li P, Li Z, Muller J-P, et al. A new quality validation of global digital elevation models freely available in China[J]. Survey Review, 2016, 48(351): 409-420.

[33] Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data[J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 54(2): 127-140.

[34] Zhang H, Zhang F, Zhang G, et al. Enhanced scaling effects significantly lower the ability of MODIS normalized difference snow index to estimate fractional and binary snow cover on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2021, 592: 125795.

[35] Xiao P, Li C, Zhu L, et al. Multitemporal ensemble learning for snow cover extraction from high-spatial-resolution images in mountain areas[J]. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41 (5): 1668-1691.

[36] Negi H S, Kulkarni A, Semwal B. Estimation of snow cover distribution in Beas basin, Indian Himalaya using satellite data and ground measurements[J]. Journal of Earth System Science, 2009, 118(5): 525-538.

[37] Wang X, Chen S, Wang J. An adaptive snow identification algorithm in the forests of northeast China[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2020, 13: 5211-5222.

[38] Wang X, Wang J, Che T, et al. Snow cover mapping for complex mountainous forested environments based on a multi-index technique[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(5): 1433-1441.

[39] Liu C, Li Z, Zhang P, et al. Variability of the snowline altitude in the eastern Tibetan Plateau from 1995 to 2016 using Google Earth Engine[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2021, 15(4): 048505.

[40] Li X, Wang N, Wu Y. Automated glacier snow line altitude calculation method using Landsat series images in the Google Earth Engine platform[J]. Remote Sensing, 2022, 14(10): 2377.

[41] 唐志光, 王建, 梁继, 等. 基于MODIS的青藏高原雪线高度遥感监测[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(4): 767-774. [Tang Zhiguang, Wang Jian, Liang Ji, et al. Monitoring of snowline altitude over the Tibetan Plateau based on MODIS data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(4): 767-774.]

[42] Deng G, Tang Z, Hu G, et al. Spatiotemporal dynamics of snowline altitude and their responses to climate change in the Tienshan Mountains, Central Asia, during 2001-2019[J]. Sustainability, 2021, 13(7): 3992.

[43] 邓海军, 陈亚宁. 中亚天山山区冰雪变化及其对区域水资源的影响[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1309-1323. [Deng Haijun, Chen Yaning. The glacier and snow variation and their impact on water resources in mountain region: A case study in Tianshan Mountains of Central Asia[J]. Acta Geographica Sinsca, 2018, 73(7): 1309-1323.]

[44] 张连成, 胡列群, 李帅, 等. 基于GIS的天山南北坡雪线分布特征及其影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 259-263. [Zhang Liancheng, Hu Liequn, Li Shuai, et al. GIS-based analysis on the snowline distributional characteristics of South and North slopes of Tianshan Mountain and their influencing factors[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(3): 259-263.]

[45] Dai Xingang, Li Weijing, Ma Zhuguo, et al. Water-vapor source shift of Xinjiang region during the recent twenty years[J]. Progress in Natural Science, 2007, 17(5): 569-575.

[46] 王圣杰, 张明军, 李忠勤, 等. 近50年来中国天山冰川面积变化对气候的响应[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 38-46. [Wang Shengjie, Zhang Mingjun, Li Zhongqin, et al. Response of glacier area variation to climate change in Chinese Tianshan Mountains in the past 50 years[J]. Acta Geographica Sinsca, 2011, 66(1): 38-46.]

[47] 陈安安, 陈伟, 吴红波, 等. 2000-2013年木孜塔格冰鳞川冰川粒雪线高度变化研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1069-1078. [Chen An'an, Chen Wei, Wu Hongbo, et al. The variations of firn line altitude on the Binglinchuan Glacier, Ulugh Muztagh during 2000-2013[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36 (5): 1069-1078.]

[48] 王宁练. 冰川平衡线变化的主导气候因子灰色关联分析[J]. 冰川冻土, 2012, 17(1): 8-15. [Wang Ninglian. Grey relational analysis of the leading climatic factor influencing the changes of the equilibrium line[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(1): 8-15.]

Monitoring of snowline altitude at the end of melting season in Tianshan Mountains from 1991 to 2021

WANG Jingwen[1], TANG Zhiguang[1], DENG Gang[1], HU Guojie[2], SANG Guoqing[1]

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Geo-Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 2. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The study of snowline altitude changes at the end of the melting season is helpful to predict future trends of snow systems in order to understand the regional and global climate changes. The remote sensing extraction method of region snowline altitude was developed based on the Google Earth Engine and Landsat satellite data. From 1991 to 2021, the snowline altitude at the end of the melting season in the four basins of the Tianshan Mountains was extracted. The variation characteristics of snowline altitude and its relationship with meteorological factors were carefully and accurately estimated. The results were as follows: (1) the extended snowline altitude at the end of the melting season correlated well with the snow cover extent (minimum) at end of the melting season, which was extracted by Sentinel−2. The overall accuracy was 91.6%, and the Kappa coefficient was higher than 0.9. The regional snowline altitude at the end of the melting season was accurately obtained with this model. (2) Generally, the snowline altitude at the end of the melting season in the study area showed an obvious increasing trend over the last 30 years. The increase rate was between 2.7 $m \cdot a^{-1}$ and 6.4 $m \cdot a^{-1}$. The rise rate of the snowline altitude in the Manas River Basin was the fastest (6.4 $m \cdot a^{-1}$), while the rise rate of the snowline altitude in the Akeyazi River Basin was the slowest (2.7 $m \cdot a^{-1}$). (3) The summer temperature was the main factor that affected the change in the snowline altitude at the end of the melting season in the study area ($P < 0.05$), while the effect of precipitation was relatively weak.

Keywords: snowline altitude; Landsat; remote sensing monitoring; climate change; Tianshan Mountains